



TBM 굴진성능 예측을 위한 NTNU 시험결과의 분석

장수호¹, 최순욱^{2*}, 이규필³, 배규진⁴

Statistical analysis of NTNU test results to predict rock TBM performance

Soon-Wook Choi, Soo-Ho Chang, Gyu-Phil Lee, Gyu-Jin Bae

ABSTRACT To predict TBM performance in design stage is indispensable for its successful application. The NTNU model, one of the representative TBM performance prediction models uses two distinct parameters such as DRI and CLI obtained from three different tests on bored rock cores. Based on DRI and CLI, it is possible to predict TBM advance rate and cutter life in the NTNU model. In this study, NTNU testing methods and their related testing equipments were introduced to measure DRI and CLI for the NTNU model. Then, in order to derive their relationships, the two key parameters measured for 39 domestic rocks were compared with physico-mechanical properties of rock such as uniaxial compressive strength and quartz content. Lastly, the experimental results were also compared with NTNU database to verify their reliability.

Keywords: TBM, NTNU test, brilling rate index, cutter life index

요약 성공적인 TBM의 적용을 위해 설계단계에서 TBM의 굴진성능을 사전에 예측하는 것이 매우 중요하다. 대표적인 TBM 굴진성능 예측모델 중의 하나인 NTNU모델에서는 TBM의 시추코어를 활용한 세 가지 시험들로부터 얻어지는 DRI와 CLI에 근거하여 TBM의 굴진율과 디스크커터의 수명 예측이 가능하다. 본 연구에서는 NTNU모델의 기본 입력변수인 DRI와 CLI를 측정하는 NTNU시험방법과 국내에서 구축된 NTNU시험장비를 소개하고, 구축된 장비를 사용하여 측정된 DRI와 CLI를 일축압축강도, 석영함유량 등의 암석 특성과 비교·분석하여 각각의 상관관계를 도출하였다. 마지막으로 NTNU의 시험 데이터베이스와의 비교를 통하여 국내에서 수행된 NTNU시험결과의 신뢰성을 확인하였다.

주요어: TBM, NTNU시험, 천공속도지수, 커터수명지수

접수일(2011.4.22), 수정일(2011.5.11), 게재확정일(2011.5.20)

¹한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 연구위원

²한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 전임연구원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정

³한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실 수석연구원

⁴한국건설기술연구원 선임본부장

*교신저자: 최순욱 (E-mail: soonugi@kict.re.kr)

1. 서 론

전 세계적으로 도심지 터널, 장대 산악터널, 하·해저터널 등에서 안전한 고속시공을 위하여 TBM의 적용이 증대되고 있다. 그러나 TBM은 사전에 예측하지 못한 지반조건의 변화에 대한 대응력이 기존 공법과 비교할 때 상대적으로 낮을 수 있기 때문에, 설계단계에서 TBM의 사전 성능예측과 공사기간 산정을 위한 굴진율 예측이 매우 중요하다. 이상과 같은 TBM의 성능평가 및 굴진율 예측방법으로는 CSM(Colorado School of Mines)모델, NTNU(Norwegian University of Science and Technology)모델, Q_{TBM} 모델, 합경도(total hardness)모델 등이 있다.

NTNU모델은 노르웨이의 NTNU에서 개발한 방법으로 노르웨이 지반조건에 대해 수십 년간 축적된 자료에 근거하여 제시된 경험적인 TBM 설계 및 성능평가 모델이다(Bruland, 1998a). 특히, 등가균열계수(equivalent fracturing factor), DRI(Drilling Rate Index) 및 CLI(Cutter Life Index)와 같은 NTNU모델 고유의 지반 특성지표로부터 TBM의 굴진율과 커터소모량의 예측이 가능하고 모델과 관련된 내용들이 모두 공개되어 있다.

CSM모델은 미국의 CSM에서 20~30년 이상 축적된 TBM 현장자료와 실험실 시험결과에 근거하여 제시된 TBM 설계모델이다(Cigla and Ozdemir, 2000). 또한 CSM에서는 LCM(Linear Cutting Machine)에 의한 암석의 선형절삭시험, 압입시험(Punch penetration test), 세르샤 마모시험(Cerchar abrasivity test) 등의 TBM 관련 시험을 병행하고 있다(정호영, 2010). 그러나 NTNU모델과 달리 CSM모델에 대한 상세 내용은 전혀 공개되지 않고 있다.

Q_{TBM} 모델은 Q시스템의 Q값과 암석의 일축압축강도, 추력, CLI, 석영함유량 등을 토대로 순굴진율과 굴진율을 예측하는데 활용되며(Barton, 2000), 합경도 모델은 반발경도시험(Schmidt hammer test)과 마모경도시험(Taber abrasion test)으로부터 산정되는 합경도에 의해 TBM의 순굴진율과 커터소모율을 예측하기 위한 경험적인 방법이다(Tarkoy, 1986). 하지만 이상의 두 가지 모델에 의해 TBM 사양의 설계 및 검토가 불가능하며, 굴진율 예측결과의 정확도도 상대적으로 낮은 것으로 고려되고 있다.

따라서 모델 내용이 공개되어 있고 TBM의 기본적인 사양 검토와 함께 TBM의 굴진성능 예측이 가능하다는 측면에서 NTNU모델의 활용성이 높다고 할 수 있다. 또한 대형 암석 시료 대신에 시추 코어를 활용하고 굴착대상 암반의 불연속면 조건을 고려할 수 있다는 장점도 가지고 있다.

하지만 앞서 언급한 바와 같이 NTNU모델에서는 암석의 굴착용이도와 디스크커터의 마모수명에 대해 NTNU모델 고유의 특성지표인 DRI와 CLI를 시험으로부터 구하는 것이 필수적이다. 그러나 DRI와 CLI에 대한 시험방법은 일반적인 암석 시험방법들과 상이하며 전 세계적으로 몇 개 기관

과 기업에서만 관련 시험장비들을 보유하고 있다.

따라서 본 연구에서는 NTNNU모델의 필수 입력자료인 DRI와 CLI를 측정하기 위한 NTNNU시험의 개념과 방법을 소개하고, 우리나라에 NTNNU모델이 적용된 이후로 축적된 NTNNU시험결과들을 분석하였다. 특히 NTNNU 시험결과들과 암석의 주요 특성을 사이의 상관관계를 파악하고자 하였다. 마지막으로 이상의 시험결과들을 노르웨이 NTNNU에서 보유하고 있는 데이터베이스와 비교하여 우리나라 암석들에 대한 NTNNU 시험결과들의 효용성을 검토하고자 하였다.

2. 암반용 TBM의 굴진성능 예측을 위한 NTNNU시험방법

2.1 NTNNU시험에 의한 DRI와 CLI의 산정방법

DRI는 암석의 천공용이도(drillability)를 평가하기 위한 지수로서, 취성도시험(Brittleness test)과 암석의 표면경도를 측정하는 천공저항시험(Siever's miniature drill test) 결과들로부터 산정된다. 즉, DRI는 취성도(brittleness value, S_{20})를 표면경도로 보정한다는 의미로 해석될 수 있다.

취성도시험은 기계적인 충격에 대한 암석의 저항력을 측정하는데 활용된다. 이 방법은 스웨덴에서 1943년에 최초로 제시되었고, 현재의 취성도시험은 1950년대 말부터 암석의 천공용이도와 굴착용이도를 평가하기 위한 시험방법으로 사용되어 왔다(Bruland, 1998c). 반면, 천공저항시험은 암석의 표면경도 또는 천공저항을 측정하기 위하여 Sievers가 1950년대에 개발한 방법이다(Bruland, 1998c).

NTNU에서는 많은 시험자료를 기반으로 하여 취성도시험과 천공저항시험으로부터 천공용이도 지수인 DRI를 제안하였다. 다음의 그림 1은 취성도(S_{20})와 천공저항지수인 SJ로부터 DRI를 계산하는데 활용되는 도표이다.

CLI는 굴착대상 암반조건에서 TBM용 디스크커터의 마모수명을 추정하는데 활용되는 지수로서, 천공저항지수 SJ와 커터마모시험(Abrasion test)에서 구한 커터마모지수(Abrasion Value Steel, AVS)로부터 다음의 식 (1)과 같이 계산된다(Bruland, 1998c).

$$CLI = 13.84 \times \left(\frac{SJ}{AVS} \right)^{0.3847} \quad (1)$$

NTNU모델에 의한 TBM 굴진성능 예측 시에는 이상의 DRI와 CLI외에도 많은 인자들이 영향을 미치는 데 대표적으로 균열도, 디스크커터 직경, 평균 디스크커터 간격 등을 들 수 있다(Bruland, 1998b).

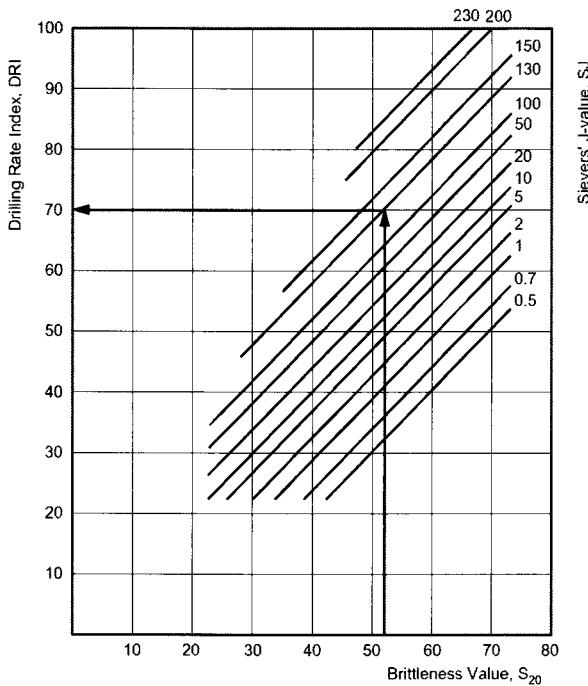


그림 1. 취성도와 천공저항 SJ에 의한 DRI의 계산 도표(Bruland, 1998c)

2.2 취성도시험 방법

취성도시험 시에는 직경이 32 mm 이상인 암석시추코어 또는 암석블록을 파쇄한 후 11.2~16 mm 크기로 채가름하여 시료를 준비한다. 이때 16 mm 이상으로 파쇄된 암석은 암석의 밀도(bulk density, ρ_s)를 측정하는데 사용된다.

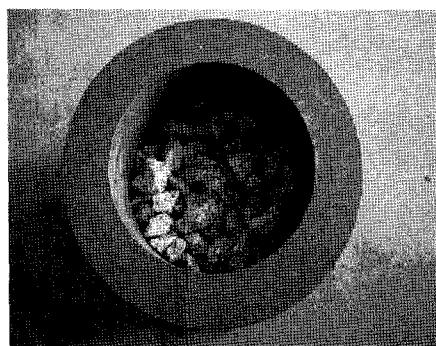
취성도시험에 사용되는 시료량은 앞서 설명한 바와 같이 입도가 11.2~16 mm에 해당하고 밀도가 2.65 g/cm³인 암석시료에 대해 1회 시험에 500 g을 사용하는 것을 기준으로 한다. 따라서 암석의 밀도에 따라 다음의 식 (2)의 예제와 같이 시험에 사용될 암석시료의 중량을 보정하여야 한다.

$$\text{밀도 } \rho_s \text{ 가 } 2.67 \text{ g/cm}^3 \text{ 인 경우의 시험중량} = \frac{2.67 \text{ g/cm}^3}{2.65 \text{ g/cm}^3} \times 500 \text{ g} = 503.8 \text{ g} \quad (2)$$

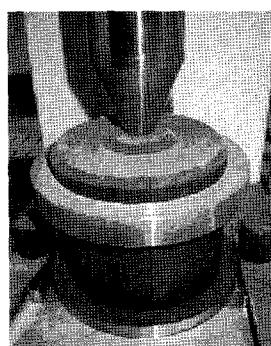
시험대상 암석의 밀도로 보정된 시료 중량을 계량하여 그림 2(a)와 같이 시험용 사발에 담고 뚜껑을 암석시험편 위에 올려놓는다. 뚜껑이 설치된 사발을 취성도 시험장비에 고정시킨 후, 그림 3과 같이 무게가 14 kg인 쇠뭉치로 25 cm의 높이에서 20번 연속하여 충격을 가한다(그림 2(b)).

시험 종료 후, 사발에서 쇄석들을 꺼내면서 표 1과 같이 다짐지수(compaction index)를 평가한다.

사발에서 꺼낸 쇄석들을 모아서 체가름 작업을 다시 수행한다. 취성도는 시험 후 11.2 mm의 체를 통과한 양의 백분율로 정의된다. 즉, 표 2와 같이 체가름 후 측정된 쇄석의 중량을 11.2 mm 체를 기준으로 구분하고, 시험전 중량에 대하여 11.2 mm보다 작은 쇄석들의 중량을 백분율로 표시한 3회 시험결과의 평균치로 취성도를 산정한다.



(a) 취성도 시험 전의 암석시료



(b) 취성도시험용 사발

그림 2. 취성도시험용 시료 및 시험장비

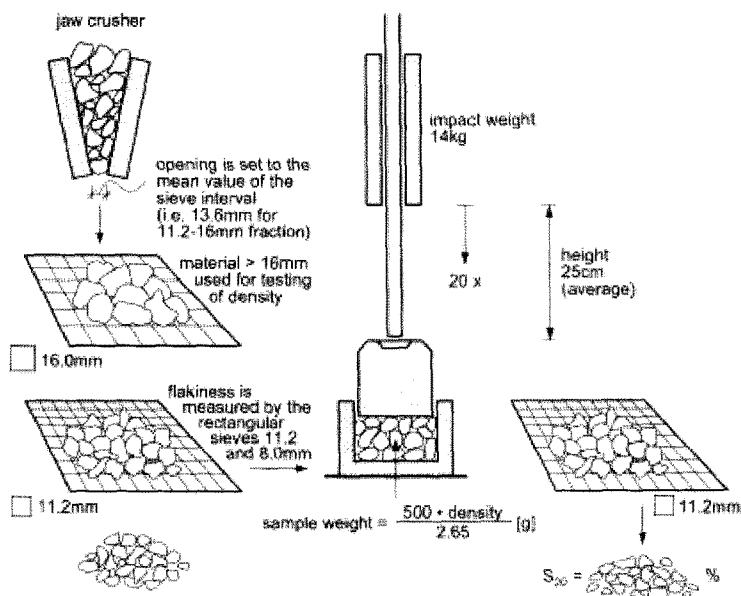


그림 3. 취성도 시험의 개요(Bruland, 1998c)

표 1. 다짐지수의 구분(Bruland, 1998c)

다짐지수	상태
0 (다짐이 없음)	사발을 뒤집어 분쇄물들을 꺼낼 때 모든 분쇄물들이 사발로부터 잘 분리됨.
1 (다짐이 일부 됨)	사발을 뒤집어 분쇄물들을 꺼낼 때 사발로부터 분리가 잘 안 되는 경우가 있음. 남은 물질들은 손가락으로 제거가 가능함.
2 (다짐이 됨)	사발을 뒤집어 분쇄물들을 꺼낼 때 소량만이 분리됨. 남은 물질들은 나무나 금속물질의 도구로 꺼낼 만큼 사발에 다짐됨.
3 (다짐이 매우 잘됨)	사발을 뒤집어도 분쇄물들이 사발과 분리 되지 않으며 남은 물질들은 뾰족한 금속물질로만 제거 될 정도로 다짐되어 있는 상태임.

표 2. 취성도 시험결과 예

구분	1회		2회		3회	
	g	%	g	%	g	%
시험전 중량	503.8	100.0	503.8	100.0	503.8	100.0
시험후 쇄석(>11.2 mm)	244.5	48.5	241.8	48.0	235.8	46.8
시험후 쇄석(<11.2 mm)	259.3	51.5	262.0	52.0	268.0	53.2

$$\text{취성도}(\text{brittleness value, } S_{20}) = 52.2$$

2.3 천공저항시험 방법

천공저항시험 시에는 암석 시추코어 또는 암석 블록을 길이와 폭이 약 50~100 mm이고 두께가 약 25~30 mm이 되도록 절단한 후 절단면의 상·하부를 평행하게 연마하여 시험편을 준비한다. 이때 엽리가 포함된 암석은 엽리와 절삭된 면이 수직을 이루도록 한다. 이상과 같이 성형된 시험편

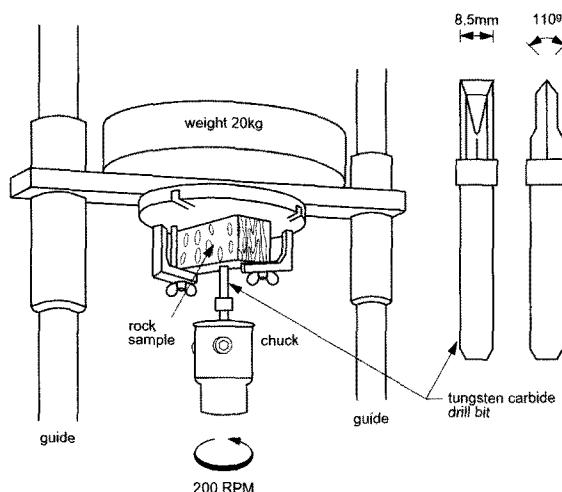


그림 4. 천공저항시험의 개요(Bruland, 1998c)

은 건조로에서 $105\pm5^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 24시간 건조된 후 데시케이터에서 $20\pm5^{\circ}\text{C}$ 의 온도 조건 하에서 보관한다.

시험 시에는 그림 4와 같이 중량이 20 kg인 추의 하부에 시험편을 고정시키고 시험편의 표면이 천공 비트의 끝과 평행이 되는지 확인한 후에 텅스텐 카바이드(tungsten carbide) 재질의 천공 비트를 1분간 200회 회전시킨다. 4~8회의 천공저항시험을 실시한 후, 마이크로미터 또는 캘리퍼스를 이용하여 천공 깊이를 $1/10 \text{ mm}$ 의 정밀도로 측정하고 그 평균값을 SJ값으로 설정한다.

2.4 커터마모시험 방법

NTNU 시험방법에서 마모저항을 측정하는 시험으로는 비트마모시험과 커터마모시험이 있다. 비트마모시험과 커터마모시험은 각각 BWI(Bit Wear Index)와 CLI를 산정하기 위하여 실시된다. 본 연구에서는 TBM에 사용되는 디스크커터 링의 마모를 검토 대상으로 하기 때문에 커터마모시험에 대해서만 설명하고자 한다.

커터마모시험에서는 앞선 취성도시험을 위한 시료를 준비할 때 부가적으로 얻어지는 1 mm 이하의 암분을 사용한다.

또한 커터마모시험에서는 실제 사용될 디스크커터 링을 절삭·가공하여 길이 30 mm , 폭 10 mm 및 표면곡선반경 15 mm 인 시험비트를 제작하여 적용한다(그림 5). 시험 전에는 반드시 시험비트의 크기와 표면이 정밀하게 연마되어 있는지 확인하여야 한다.

시험 전에 0.001 g 정밀도를 가지는 정밀 저울을 사용하여 시험비트의 중량을 측정한 후, 시험비트를 그림 5와 같이 중량 10 kg 추의 하부에 고정한다. 추의 하부에 고정된 시험비트는 암분이 공급되는 원판과 평행하게 접촉되어 원판의 회전에 따라 암분에 의해 마모가 발생하게 된다. 이때

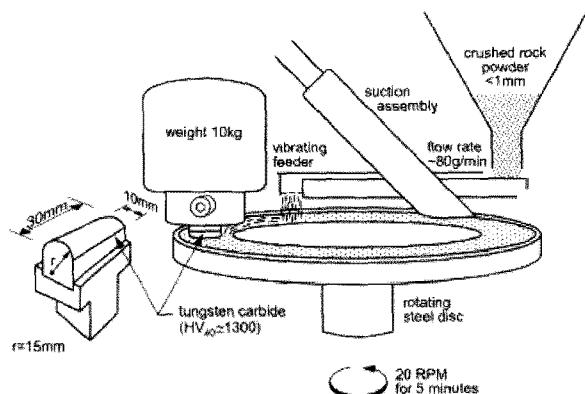


그림 5. 커터마모시험의 개요(Bruland, 1998c)

암분의 공급속도는 80 g/min이며 원판은 1분에 20회 회전한다. 시험이 완료된 후 시험비트를 분리하여 마모된 중량을 0.001 g단위로 측정한다. 시험은 2~4회 반복 수행되며 시험비트 마모중량의 평균값을 커터마모지수, 즉 AVS로 적용한다.

2.5 NTNU 시험장비의 구축

본 연구에서는 NTNU모델의 필수 입력정보인 암석의 DRI와 CLI를 측정하기 위하여 NTNU에서 제시한 시험방법에 부합되도록 제작된 취성도 시험장비, 천공저항 시험장비 및 커터마모 시험장비를 활용하였다.

취성도 시험장비는 그림 6과 같이 제작상의 주요사항인 14 kg의 쇠뭉치로 25 cm의 높이에서 20번 연속하여 충격을 가할 수 있도록 제작되었다. 천공저항시험장비는 그림 7과 같이 시험편이 설치되는 상부에 중량 20 kg의 추를 설치하고 천공시험 중에만 추에 의한 하중이 가해지도록 하였으며, 천공 비트의 회전속도를 조절할 수 있으며 기본적으로 200 rpm으로 설정되어 있다. 천공 비



그림 6. 취성도 시험장비

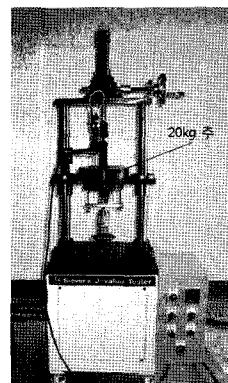


그림 7. 천공저항 시험장비



그림 8. 커터마모시험 장비 및 시험장면

트는 그림 4에 제시된 형상을 만족하도록 텅스텐 카바이드 재질로 제작되었다.

커터마모 시험장비(그림 8)는 10 kg초 하부에 시험비트를 설치할 수 있도록 제작되었고, 80 g/min의 속도로 암분을 공급하는 암분 공급장치를 포함하고 있다. 암분공급장치는 그림 8과 같이 경사를 이루고 있으며, 하부에 바이브레이터를 장착하여 원판회전과 동시에 바이브레이터가 작동되도록 하여 진동과 장치의 경사에 의해 원판으로 암분이 공급되도록 제작하였다.

3. 국내 암석에 대한 NTNU시험결과의 분석

3.1 분석대상 자료들의 분포특성

본 연구에서는 2.5절과 같이 구축한 NTNU시험장비를 활용하여 현재까지 국내 암석들에 대해 측정된 총 39건의 NTNU시험결과들을 분석하고자 하였다(표 3). 이상의 총 39개 시험결과들의 대부분은 TBM터널의 설계단계에서 TBM의 굴진율 예측을 위해 측정된 것이다.

시험결과들의 분포특성을 파악하기 위하여 시험대상 암석의 지역, 암종, 일축압축강도, DRI 및 CLI에 대한 히스토그램(histogram)을 작성하였다.

첫 번째로 본 연구의 분석대상 시험결과들의 지역별 분포를 분석한 결과(그림 9), 전체 시험자료 가운데서 서울이 59%로서 가장 많았으며, 경기지역까지 포함하면 전체의 약 74%로서 대부분이 수도권에 집중되어 있는 것으로 나타났다. 이는 TBM이 서울과 경기도를 중심으로 한 대도시권에 주로 적용 또는 검토되었기 때문인 것으로 사료된다.

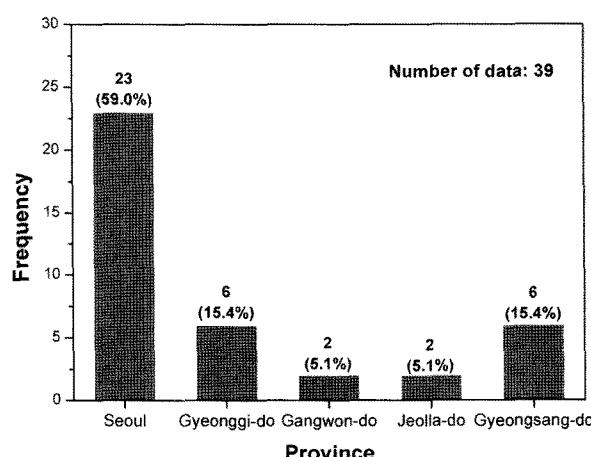


그림 9. 분석대상 시험결과들의 지역적 분포

표 3. 분석대상 암석들의 시험결과와 NTNU모델로 예측된 커터 관입깊이

위치	암종	평균 일축압축강도 (MPa)	석영 함유량 (%)	NTNU시험결과					커터 관입깊이 t_e (mm/rev)
				SJ	S_{20}	AVS	DRI	CLI	
서울	편마암	97.1	-	18.2	36.7	9.0	41	18	-
서울	편마암	153.0	-	5.0	29.9	5.7	27	13	-
서울	편마암	222.2	-	7.1	30.3	3.0	28	19	-
서울	편마암	163.3	-	1.0	37.7	6.0	26	7	-
서울	편마암	250.1	-	12.1	30.9	6.3	33	18	-
서울	편마암	294.6	-	1.2	36.8	5.3	25	8	-
서울	편마암	244.3	-	15.4	34.8	3.7	28	24	-
서울	편마암	204.7	-	20.4	25.9	2.0	30	34	-
서울	화강암	87.3	-	6.0	57.0	4.0	57	6	-
서울	편마암	130.9	-	2.0	42.6	4.0	35	11	-
서울	편마암	109.0	-	2.1	38.6	5.0	32	10	-
서울	편마암	49.4	38.0	5.7	48.7	2.0	48	21	9.6
서울	편마암	48.8	61.0	6.3	35.0	4.0	32	17	8.7
서울	편마암	85.0	36.6	1.2	36.5	6.0	26	8	8.5
서울	편마암	88.9	32.9	1.5	36.7	6.0	28	8	9.9
서울	편마암	56.7	38.8	4.1	37.8	4.0	33	14	9.1
서울	편마암	55.3	26.3	4.6	39.6	1.0	37	25	8.2
서울	편마암	77.9	26.3	20.8	54.1	2.0	58	34	8.2
서울	편마암	68.7	26.3	19.5	52.9	2.0	57	33	8.2
서울	편마암	117.4	26.3	3.9	34.5	1.0	30	23	8.2
서울	화강암	73.4	38.2	2.5	71.0	3.0	67	13	-
서울	화강암	73.4	38.2	2.5	66.1	5.0	61	11	-
서울	편마암	136.5	-	8.8	36.5	6.0	35	16	-
경기도	편마암	91.5	45.0	4.1	42.3	13.0	37	9	-
경기도	편마암	123.8	43.0	1.8	44.0	16.0	36	6	-
경기도	편마암	130.0	31.5	3.0	35.5	2.0	29	16	9.9
경기도	편마암	-	-	5.5	44.1	2.0	42	20	-
경기도	편마암	58.6	45.0	2.4	36.5	3.0	28	13	10.8
경기도	편마암	101.2	45.0	3.2	33.3	2.0	27	17	10.7
부산	화강암	36.5	40.5	81.9	86.0	15.0	97	27	-
부산	응회암	115.5	5.0	3.8	52.9	8.0	47	29	-
부산	안산암	108.0	18.9	7.6	61.8	2.0	61	23	7.6
강원도	화강암	91.3	20.0	19.2	46.4	2.0	48	33	-
강원도	석회석	63.6	1.0	33.8	56.7	2.0	61	41	-
경상남도	화강암	107.6	23.5	15.9	55.2	7.0	57	19	-
경상북도	화강암	147.6	-	5.4	57.2	18.0	54	9	-
경상북도	세일	130.9	-	1.9	53.0	13.0	46	7	-
전라남도	안산암	158.3	-	6.0	55.4	2.0	53	21	-
전라북도	화강암	183.4	37.0	3.4	48.3	33.7	43	6	-

분석대상 시험결과들을 분석한 결과에서도, 수도권의 주요 암종인 편마암과 화강암이 전체의 약 87%를 차지하였다(그림 10). 특히, 편마암의 비율이 66.7%로서 가장 많았으며, 안산암, 응회암, 석회석 및 세일은 각각 1~2건에 불과하였다.

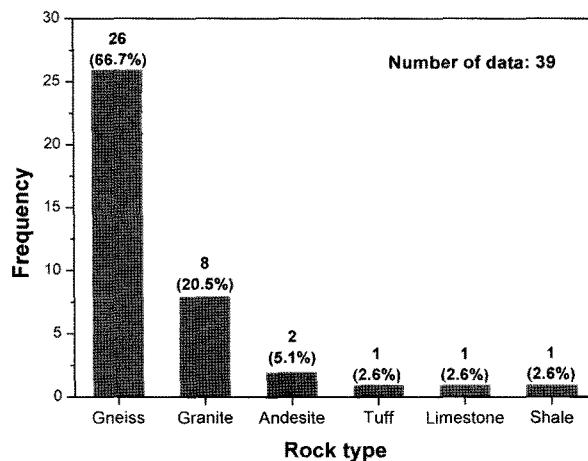


그림 10. 분석대상 시험결과들의 암종별 분포

시험대상 암석들의 일축압축강도의 분포를 살펴보면, 전체 평균이 약 125 MPa이고 약 31%가 100~150 MPa 수준인 것으로 나타났다(그림 11). 일축압축강도가 50~100 MPa인 암석은 전체 자료의 약 36%를 차지하였다. 이와 같이 일축압축강도가 100 MPa이상인 경암 조건에서도 TBM의 적용이 검토된 사례가 적지 않음을 알 수 있다. 분석대상 자료들의 최대 일축압축강도와 최소 일축압축강도는 각각 294.6 MPa과 36.5 MPa 이었다.

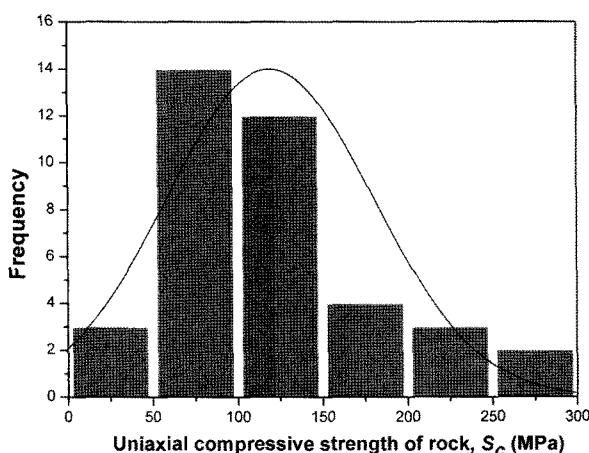


그림 11. 분석대상 시험결과들의 일축압축강도 분포

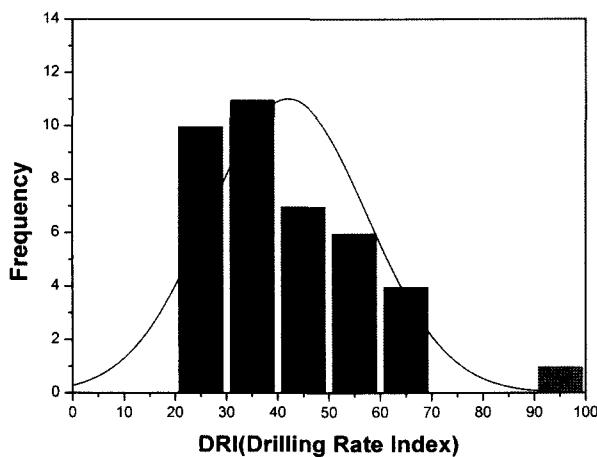


그림 12. 분석대상 시험결과들의 DRI 분포

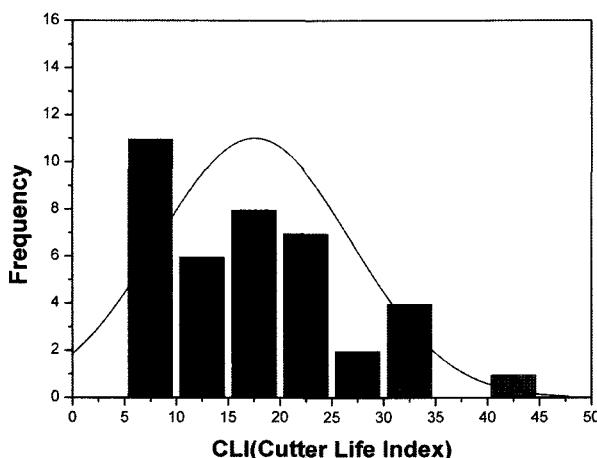


그림 13. 분석대상 시험결과들의 CLI 분포

표 4. DRI와 CLI의 분류(Bruland, 1998c)

Category	DRI	CLI
Extremely low	≤ 25	≤ 5
Very low	$26 \sim 32$	$5.0 \sim 5.9$
Low	$33 \sim 42$	$6.0 \sim 7.9$
Medium	$43 \sim 57$	$8.0 \sim 14.9$
High	$58 \sim 69$	$15.0 \sim 34$
Very High	$70 \sim 82$	$35 \sim 74$
Extremely High	≥ 83	≥ 75

측정된 DRI의 분포결과에 따르면, 표 4에 제시된 DRI 분류를 적용할 때 천공용이도가 매우 낮은 수준(DRI=26~32)에서 낮은 수준(DRI=33~42)인 암석이 전체의 약 54%로서 굴착에 대한 저항성이 상대적으로 높은 암석들의 비율이 높음을 알 수 있다(그림 12).

그림 13은 분석대상 암석들의 CLI 분포로서, 표 4의 CLI 분류를 적용할 때 약 44%의 자료에서 커터수명지수가 매우 낮은 수준에서 보통 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 나머지 56%의 자료에서는 커터수명이 비교적 높게 나타났다.

3.2 NTNU시험결과와 암석 특성과의 상관관계 분석

NTNU시험결과인 DRI와 CLI를 암석의 여러 특성들 가운데에서 TBM 굴진성능과 커터소모량 예측에 가장 일반적으로 활용되고 있는 일축압축강도 및 석영함유량과 비교 · 분석하였다.

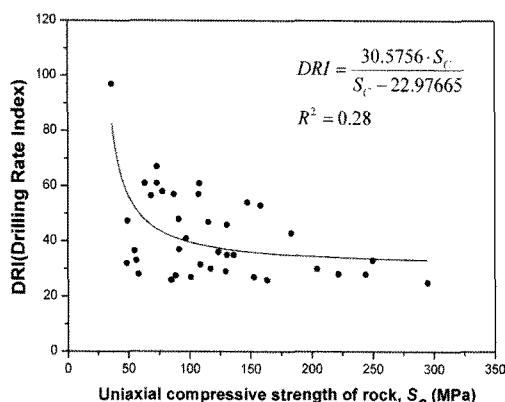


그림 14. 일축압축강도와 DRI의 관계

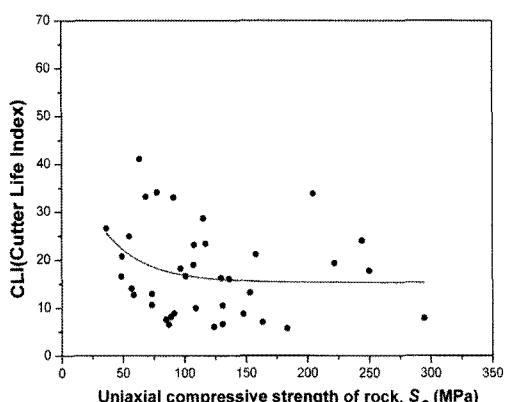


그림 15. 일축압축강도와 CLI의 관계

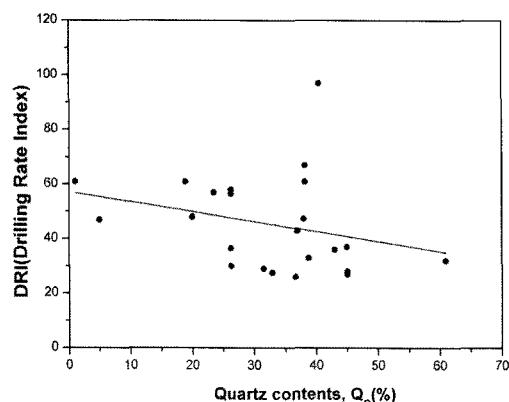


그림 16. 석영함유량과 DRI의 관계

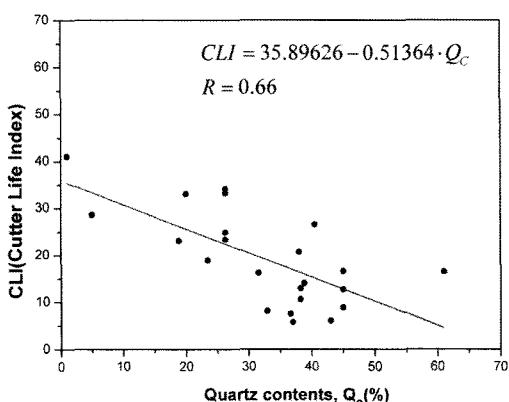


그림 17. 석영함유량과 CLI의 관계

그림 14는 DRI와 일축압축강도와의 관계를 도시한 것으로서, 음지수함수와 유사하게 암석의 일축압축강도가 커질수록 DRI, 즉 암석의 천공용이도가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 2차원적인 회귀분석 결과로부터 얻어진 결정계수는 그다지 높지 않았으며 선형적인 반비례 관계를 보이지는 않았다. 반면, CLI와 일축압축강도는 상관관계가 매우 낮은 것으로 나타났다(그림 15).

암석의 석영함유량은 DRI와의 상관관계는 매우 낮게 나타났으나 CLI와는 상관계수가 0.66으로서 비교적 양호한 선형적인 반비례 관계를 나타내었다(그림 16 및 그림 17). 즉, 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이 암석의 석영함유량이 TBM 디스크커터의 수명에 큰 영향을 끼치는 요인임을 재확인할 수 있었다.

3.3 NTNU 데이터베이스와의 비교

본 연구의 분석에서 활용된 국내 암석들에 대한 시험결과들의 유효성을 확인하고자, 2,949개의 자료로 구성된 NTNU의 데이터베이스(Bruland, 1998d)와 비교를 수행하였다. 특히 최근 들어 NTNU에서 직접 수행한 결과들에 대해서는 DRITM, CLITM 등과 같이 트레이드마크를 부여하고 있고 NTNU이외의 기관에서 DRI와 CLI의 측정할 경우 NTNU에서 제시한 시험방법들을 반드시 준수할 것을 요구하고 있는 상황으로서(<http://www.drillability.com>), 국내에서 측정된 시험결과들의 타당성을 NTNU데이터베이스와의 비교를 통해 간접적으로 검토할 필요가 있었다.

그림 18은 DRI와 S₂₀의 관계를 도시한 것으로서 DRI와 S₂₀는 매우 뚜렷한 선형관계를 가지는 것을 알 수 있으며, 또한 국내 암석들에 대해 측정된 시험결과가 NTNU의 자료분포에 포함되는 것을 확인할 수 있다.

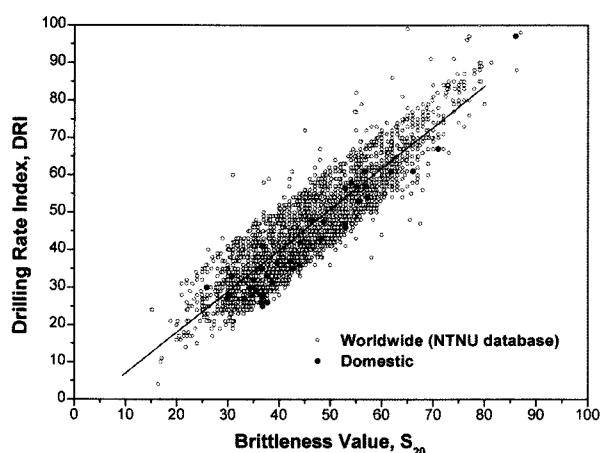


그림 18. DRI와 S₂₀의 상관관계

DRI와 SJ의 상관관계 그래프에서도 역시 국내 시험결과들이 NTNU 자료범위 이내에 포함되는 것으로 나타났다(그림 19). 그러나 DRI와 S_{20} 의 관계와는 달리 DRI와 SJ의 뚜렷한 선형관계는 관찰되지 않았다.

마지막으로 CLI는 커터마모시험으로부터 얻어지는 커터마모지수인 AVS와 뚜렷한 음지수함수 관계를 가지며 국내 시험결과들의 분포 역시 NTNU 자료범위에 포함되는 것으로 나타났다(그림 20). 그러나 NTNU 데이터베이스와 비교할 때, 국내 시험결과들은 동일한 AVS값에서 상대적으로 CLI가 낮게 평가되었음을 알 수 있다. 이상의 결과는 석영합유량과 같은 암석의 특성과 디스크커터의 재질 특성 등의 차이에 따른 것으로 사료되며 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

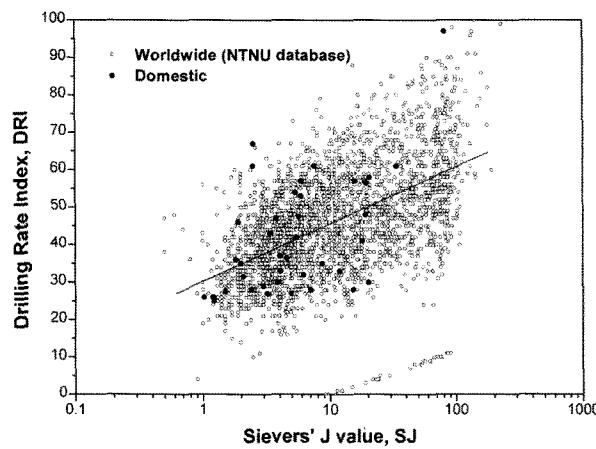


그림 19. DRI와 SJ의 상관관계

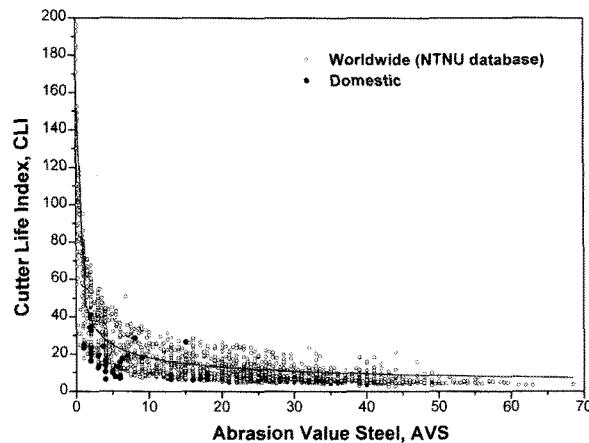


그림 20. CLI와 AVS의 상관관계

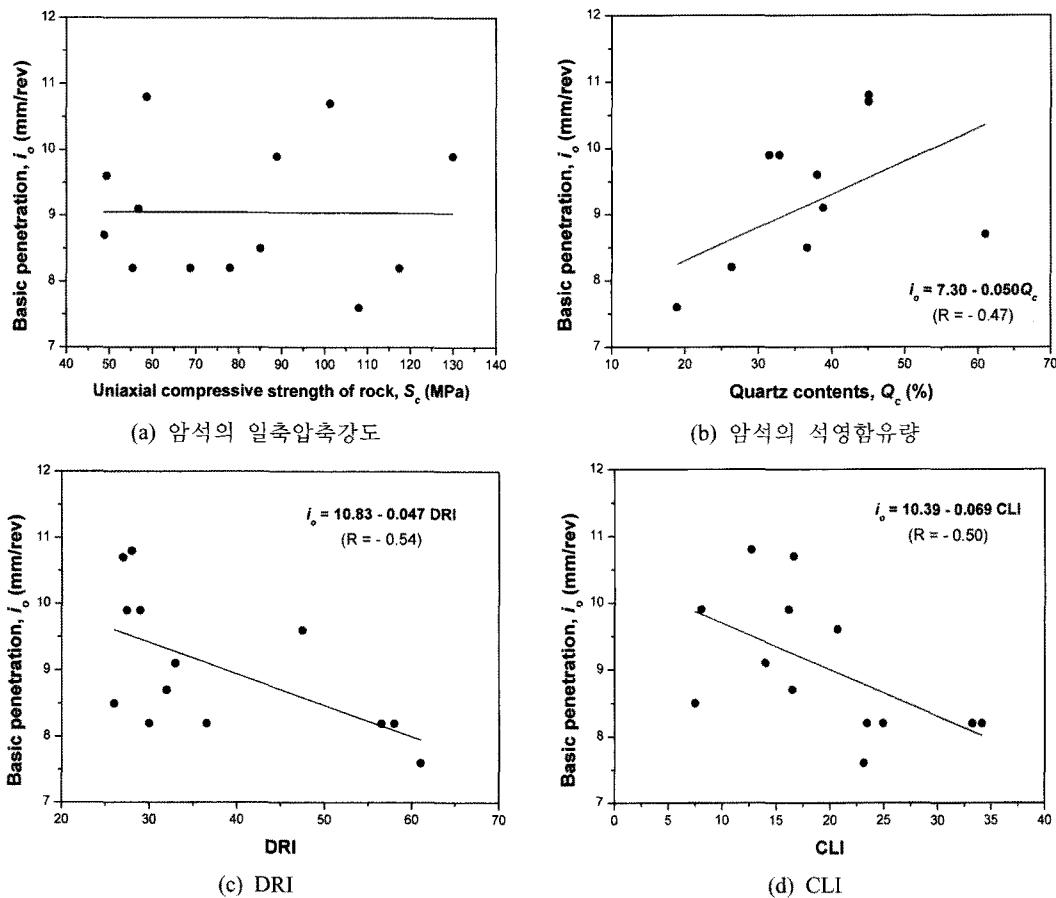


그림 21. NTNU모델에 의한 커터 관입깊이 예측결과와 암석 특성들과의 상관관계

3.4 NTNU모델로 예측된 커터 관입깊이와 암석 특성과의 상관관계 분석

본 연구에서는 TBM터널의 설계단계에서 NTNU모델로 예측된 13건의 커터헤드 1회전당 커터 관입깊이와 암석 특성들의 상관관계를 분석하였다.

물론 NTNU모델에 의한 커터 관입깊이 예측에는 최대 3개까지의 암반 불연속면 조건, 디스크커터의 직경, 평균 커터 간격 등이 함께 활용되기 때문에(Bruland, 1998b), 커터 관입깊이 예측결과와 암석 특성들을 직접적으로 비교하는 것은 어려울 수 있으나 본 연구에서 고려한 네 가지 암석 특성들 가운데 커터 관입깊이와의 상대적인 상관관계가 높은 특성을 파악하기 위한 기초적인 목적으로 분석을 실시하였다.

분석 결과, NTNU모델로 예측된 커터 관입깊이는 암석의 일축압축강도와는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다. 반면, 상관계수가 크지는 않지만 암석의 석영함유량, DRI 및 CLI는 커터 관입

깊이와 선형에 가까운 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 암석의 석영합유량이 높을수록 커터의 관입깊이는 증가하는 경향을 나타내었고, DRI와 CLI는 커터 관입깊이와 반비례 관계를 나타내었다(그림 21). 이는 경암일수록 커터 관입깊이가 상대적으로 크게 예측된다는 것을 보여주는 결과로서, 경암인 경우에는 커터 관입깊이를 크게 적용해도 굴진면의 안정성 확보가 용이하기 때문인 것으로 사료된다. 더욱이 NTNNU모델로 예측된 커터 관입깊이는 커터의 최대 하중용량을 고려하여 계산된 결과이다. 하지만, 본 연구에서 활용된 커터 관입깊이 예측결과들의 범위는 7~11 mm/rev 사이로서, 보다 다양한 커터 관입깊이 예측결과들에 대한 심도 있는 추가 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 TBM 굴진성능 예측을 위한 NTNNU모델에서 필수적으로 적용되는 DRI와 CLI의 시험방법과 이에 근거하여 구축된 NTNNU시험장비를 소개하였으며, 국내 암석들에 대해 측정된 총 39개의 NTNNU시험결과들을 분석하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 주요 결과들은 다음과 같다.

1. 암석의 일축압축강도와 DRI는 음지수함수에 가까운 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 암석의 일축압축강도가 커질수록 암석의 천공용이도는 감소하는 것을 알 수 있다. 반면, 암석의 일축압축강도와 CLI의 상관관계는 매우 낮게 나타났다.
2. 암석의 석영합유량과 커터수명지수는 선형적인 반비례 관계를 가지는 것으로 나타나 암석의 석영합유량이 디스크커터의 수명에 큰 영향을 끼치는 요인임을 확인할 수 있었다
3. 국내 암석들에 대해 측정된 총 39개 시험결과들과 NTNNU에서 보유한 2,949개의 시험자료들을 비교한 결과, 국내 암석들에 대해 측정된 시험결과가 NTNNU의 자료 분포범위에 모두 포함되는 것으로 나타나 국내에서 수행된 NTNNU시험과정의 효용성을 간접적으로 확인할 수 있었다. 단, NTNNU자료와 비교할 때 CLI가 상대적으로 낮게 평가되는 것으로 나타났으며, 이는 석영합유량과 같은 굴착대상 암석의 특성과 디스크커터 재질 등의 차이에 기인된 것으로 사료된다.
4. 설계단계에서 NTNNU모델로 예측된 13건의 커터 관입깊이와 암석 특성들과의 상관관계를 분석한 결과, 암석의 일축압축강도와 커터 관입깊이 예측결과는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다. 반면, DRI와 CLI는 커터 관입깊이 예측결과와 선형적인 반비례 관계를 나타내었다. 즉, DRI와 CLI가 낮은 경암인 경우에는 커터 관입깊이를 크게 적용해도 굴진면의 안정성 확보가 용이하기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 본 연구에서 적용된 커터 관입깊이 예측결과들의 범

위가 7~11 mm/rev인 관계로 추가적인 자료축적과 그에 따른 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호: 10CCTI-B056690-01) - 1세부과제: TBM 커터헤드 최적 설계기술 및 고성능 디스크커터 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

참 고 문 헌

1. 정호영(2010), “암석의 압입 특성과 TBM 디스크 커터 절삭 성능과의 관계에 대한 실험적 분석”, 공학석사 학위논문, 서울대학교 대학원.
2. Barton, N. (2000), “TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock”, A.A. Balkema, Rotterdam.
3. Bruland, A. (1998a), “Hard rock tunnel boring - Background and discussion”, Vol. 1, Doctoral Theses at NTNU 1998:81.
4. Bruland, A. (1998b), “Hard rock tunnel boring - Advance rate and cutter wear”, Vol. 3, Doctoral Theses at NTNU 1998:81.
5. Bruland, A. (1998c), “Hard rock tunnel boring - Drillability test methods”, Vol. 8, Doctoral Theses at NTNU 1998:81.
6. Bruland, A. (1998d), “Hard rock tunnel boring - Drillability catalog of drillability indices”, Vol. 9, Doctoral Theses at NTNU 1998:81.
7. Cigla, M., Ozdemir, L. (2000), “Computer modeling for improved production of mechanical excavators”, Proc. of Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME) Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, pp. 1-12.
8. Tarkoy, P.J. (1986), “Practical geotechnical and engineering properties for tunnel-boring machine performance analysis and prediction”, Transportation Research Record, pp. 62-77.